

과도한 계절양수로 지하수가 고갈되는 충적대수층에서의 효율적인 지하수 인공함양 전략

박경미¹ · 이현주¹ · 구민호^{1,*} · 김용철²

¹공주대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원

요 약

지하수 모델링 기법을 이용하여 과도한 계절양수로 인해 지하수 고갈 문제가 발생한 지역에서의 효율적인 인공함양 방법을 제시하였다. 동절기 계절양수가 이루어지는 충적대수층을 대상으로 개념모델을 설계하였으며, 다수의 수치모의를 통하여 지하수위 회복에 유리한 인공함양 위치 및 시기를 탐색하였다. 모의 결과, 인공함양의 위치는 하천과의 이격거리가 길며, 지하수 고갈 위험성이 높은 배후지역에 주입하는 것이 지하수위 회복에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 대수층의 수리특성과 하천과 관정사이 거리에 의해 결정되는 하천고갈 인자(SDF)는 인공함양 시기 결정 시 효율성에 영향을 미치는 중요한 인자로 확인되었다. SDF가 작을 경우, 인공함양의 영향이 하천까지 빠르게 도달되므로 양수와 동시에 주입하는 것이 효과적인 것으로 분석되었다. 반면, SDF가 클 경우, 인공함양 시기의 영향이 미미하여 수자원 확보가 쉬운 여름철에 주입하는 것이 보다 효율적인 것으로 분석되었다. 또한 양수정이 하천으로부터 멀어질수록 지하수가 더 빠르게 고갈될 것으로 분석되어 지하수를 많이 사용하는 시설재배 지역의 경우 다수의 양수정을 하천 인근에 개발하는 것이 지하수 고갈 문제를 예방하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

주요어: 인공함양, 계절양수, 하천고갈인자(SDF), Visual Modflow

Gyeongmi Park, Hyeonju Lee, Min-Ho Koo and Yongcheol Kim, 2016, Strategies for an effective artificial recharge in alluvial stream-aquifer systems undergoing heavy seasonal pumping. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 211-219

ABSTRACT: Visual Modflow is used to evaluate the optimal planning of artificial recharge for agricultural areas having local groundwater shortage by excessive seasonal pumping. A hypothetical conceptual model was assumed to simulate alluvial stream-aquifer systems undergoing seasonal groundwater pumping and seasonal recharge. A series of numerical simulations are performed to analyze the optimal period and location of artificial recharge by using the recovery of groundwater levels. The results show that the water level is effectively recovered if the injection wells are located far from the stream that recharges water to the aquifer by stream-aquifer interactions. The stream depletion factor (SDF), the characteristic time scale determined by the aquifer properties and the well location associated with the stream, is the critical parameter that affects effectiveness of the artificial recharge. In the case of a small SDF value, artificial recharge is effective when it is carried out in the same period of pumping. However, in the case of a large SDF value, the period of recharge does not affect the degree of water level recovery. Therefore, recharging in the rainy season is preferable due to a plentiful source of recharge water in this season. It is also demonstrated that the farther away the pumping well from the stream, the more groundwater depletion is probable. Thus, avoiding groundwater use in this area by locating more pumping wells in areas nearby the stream could be a good strategy to prevent groundwater depletion by heavy pumping.

Key words: artificial recharge, seasonal pumping, stream depletion factor (SDF), visual modflow

(Gyeongmi Park, Hyeonju Lee and Min-Ho Koo, Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32888, Republic of Korea; Yongcheol Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-41-850-8515, E-mail: koo@kongju.ac.kr

1. 서론

최근 국내에서는 연중 일정한 온도의 지하수를 이용하여 난방비를 절약하는 수막재배와 시설재배의 면적이 증가하고 있으며, 이로 인해 농업용 지하수의 이용량 또한 증가하는 추세이다. 수막재배의 경우 지하수 이용이 겨울철에 집중되어 있어 배후지 지하수 고갈문제를 초래하며, 인근 하천유량의 감소를 유발시키고 있다. 실제로 다수의 시설농가에서 지하수 고갈로 인해 수막재배를 하는데 어려움을 겪고 있으며, 지하수 양수량을 늘리기 위해 심부 신규 관정을 개발하거나 수막재배를 포기하는 현상이 발생하고 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2009). 전 세계적으로 지하수 과잉취수로 인한 지하수 고갈 문제가 대두되고 있는 상황이며(Kinzelbach *et al.*, 2003), 이러한 문제를 예방하고자 지하수 개발가능량 산정에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Chung and Lee, 2013).

하천변 충전대수층에서의 과도한 지하수 사용은 지하수 흐름계를 변화시켜 하천-대수층 상호작용에도 영향을 미칠 수 있어 하천-대수층 상호작용에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있다(Constanz, 1998). Kim *et al.* (2012)은 비닐하우스 밀집지역의 하천수량 변화를 계측하여 지하수 양수에 따른 지하수위 변화와 하천-대수층간의 상호 유동량 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한 Lee *et al.* (2016)는 지하수 모델링 기법을 이용하여 국내 수변지역에서의 하천-대수층 상호작용을 살펴보았으며, 수막재배로 인한 계절양수가 하천건천화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Jenkins (1968)는 하천과의 이격거리와 대수층의 수리상수로 구성된 함수를 제시하여 양수가 하천유량에 미치는 영향을 평가하였다. 하천고갈 인자(stream depletion factor, SDF)는 하천과 우물 사이 거리의 제곱을 수리확산계수로 나눈 값이다. 수리확산계수는 투수량계수와 저유계수의 비를 나타내며, 지하수 함양과 같이 대수층에 가해진 수리적 스트레스가 해소되는데 걸리는 시간을 결정한다(Koo and Lee, 2002). 즉, SDF에 따라 양수 후 지하수위가 평형상태에 도달하는데 걸리는 대수층 반응시간(hydraulic response time)이 결정된다(Alley *et al.*, 2002). SDF가 증가할수록 대수층 반응시간은 길어지며, 이는 양수 후 지하수위가 새로운 평형상

태에 도달하기까지 오랜 시간이 걸리는 것을 의미한다(Lee *et al.*, 2016).

최근 지속가능한 수자원 확보방법들이 주목받으면서 이와 관련된 연구들이 활발히 수행되고 있다. 인공함양 기법은 가장 적극적인 수자원 확보 방안으로 풍수기에 잠재 수자원을 대수층에 주입하여 수자원을 확보하는 기술로 미래에 그 활용이 더욱 확대될 것으로 예상된다(Bouwer, 2002). 또한 인공함양은 불포화대 및 충전층의 정화능력을 이용하여 지하수 수질개선에 이용될 뿐만 아니라 과도한 지하수 개발로 저하된 지하수위를 복원하고 갈수기 하천 건천화를 예방하는 등 다양한 용도로 활용될 수 있다(Kim and Kim, 2009, 2010). Seo *et al.* (2011)는 지리정보시스템(Geographic Information System)을 사용하여 인공함양 개발 유망지역을 분석하였으며, Oh *et al.* (2011)은 지하수 인공함양에 따른 지하수계 변화를 모의하는 지하수 모델을 개발하여 지하수위 변동 및 대수층의 물수지 변화를 예측하였다. Lee *et al.* (2014)는 주입정 위치에 따른 기존 양수정의 양수량 변화를 모의하여 최적의 주입정 위치를 분석하였다. 또한 Kim *et al.* (2012)는 인공함양의 국내외 특허 기술동향을 분석하여 공백 기술 분야를 파악하였고, Park *et al.* (2015)는 균열암반 대수층에 수돗물 주입 시 수온 및 전기전도도 변화를 분석하여 인공함양의 영향을 평가하였다.

이처럼 인공함양기법을 실제 현장에 적용하거나 모델링을 통하여 지하수계 변화를 분석한 연구는 활발히 수행되었지만, 효율적으로 지하수위를 회복시키는 인공함양 시기 및 위치를 평가한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하수 모델링 기법을 이용하여 계절양수 시 최적의 인공함양 시기 및 위치를 평가하였으며, SDF에 따른 효율적인 인공함양 전략을 제시하였다.

2. 개념모델

시설재배 지역의 지하수위 회복에 유리한 인공함양 위치 및 시기를 평가하기 위해 Visual Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988)를 이용하여 국내 하천변 충전대수층을 단순화한 모델을 개발하였다(그림 1). 모델 영역은 4 km × 4 km의 정사각형 모양으로 설정하였으며, 35 m 두께의 1개 층으로 구

성된 균질, 등방성의 자유면대수층을 가정하였다. 격자의 크기는 10 m × 10 m이며, 격자망은 400행, 400열로 총 160,000개의 격자로 구성하였다. 하천은 모델 영역의 남쪽과 동쪽 끝단에 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하였으며, 북쪽과 서쪽은 불투수경계(no flow boundary)로 설정하였다. 곡류하천을 가정하기 위해 남서쪽 끝 점에 20.5 m의 수위를 주고 1/8000의 하천 경사를 주어 동북쪽 끝 점이 19.5 m의 수위가 되도록 임의로 설정하였다. 투수성이 좋은 수변지역 충적 대수층을 표현하기 위하여 수리전도도는 10 m/day를 기본 값으로 설정하였으며, 비산출률은 0.1로 설정하였다. 관측정은 하천으로부터 1 km, 2 km, 3 km 떨어진 곳에 설치하였다.

강수가 여름철에 집중되는 국내의 계절 특성을 반영하기 위해 1년 중 200일에서 300일 사이를 풍수기로 가정하여 100일 동안 강수에 의해 지하수가 함양되는 것으로 설정하였다(그림 2). 강수에 의한 지하수 함양률의 시간적 변화는 지하수면의 심도 및 대수층을 구성하는 매질의 특성에 의해 다양한 양상을 보일 수 있다(Koo and Lee, 2002). 하지만 모델의 단순화를 위해 우리나라 연평균 강수량의 일정비율(10%)이 함양되는 것으로 가정하여 함양량은 200 mm/yr로 설정하였다.

한편, 국내 시설재배를 위한 지하수 이용은 주로 겨울철에 집중되어 있다. 이를 모델에 반영하기 위하여 1년 중 초기 100일을 동절기로 가정하여 이 기간 동안 양수를 실시하였으며, 나머지 236일 동안에는 양수를 중단하였다(그림 2). 대규모 시설재배단지의 경우, 비닐하우스가 밀집하고 있어 인접한 다

수의 양수정이 균집을 형성하고 있다. 따라서 양수정을 설치하는 대신 음(-)의 값을 갖는 함양패키지(recharge package)를 설정하여 모델 영역의 전 지역에서 고르게 양수되는 것으로 가정하였다. 실제 시설재배는 기온이 낮은 저녁부터 새벽까지 약 12시간 동안 지하수를 사용하지만, 24시간 양수하였을 경우와 비교했을 때 양수로 인해 발생한 지하수 유출량 변화 양상은 동일하였다(Lee et al., 2016). 따라서 본 모델에서는 24시간 양수 하는 것으로 설정하였다.

한편, 인공함양에 따른 지하수위 변동과 하천-대수층 상호작용을 평가하기 위해 양수량의 25%가 인공함양 되도록 설정하였다. 인공함양지는 각 하천경계로부터 3500 m 떨어진 곳에 위치하며, 총길이와 폭은 2 km와 20 m로 설정하였다(그림 1). 인공함양의 시기는 그림 1과 같이 시설재배 계절양수와 동일한 시기(P₁), 시설재배 이후(P₂), 그리고 하천수량이 풍부한 풍수기(P₃)로 구분하여 인공함양의 효율성을 비교하였다.

자연 상태에서 대수층의 저유량은 지속적으로 변하는 비평형 상태에 있으나, 장기적으로 볼 때 주기적으로 반복되는 강우 특성에 의해 지하수 함양과 기저 유출의 균형을 통하여 동적인 평형상태가 된다(Koo and Lee, 2002). 이를 모델에 반영할 경우 지하수위 변동은 동적순환초기조건(dynamic cyclic initial conditions)을 이용하여 모사를 수행한다(Anderson and Woussner, 1992). 본 연구에서는 20년 동안 지하수 흐름을 모사하여 동적인 평형상태에 도달하도록 하였으며, 이때 계산된 지하수위를 부정류 모델의 초기조건으로 설정하였다.

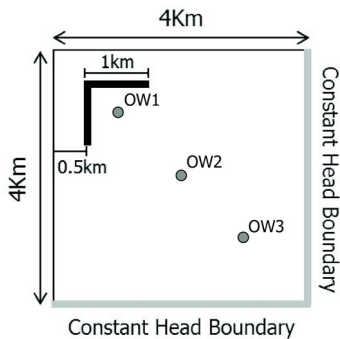


Fig. 1. Conceptual model showing the model domain, the boundary condition and the location of observation wells.

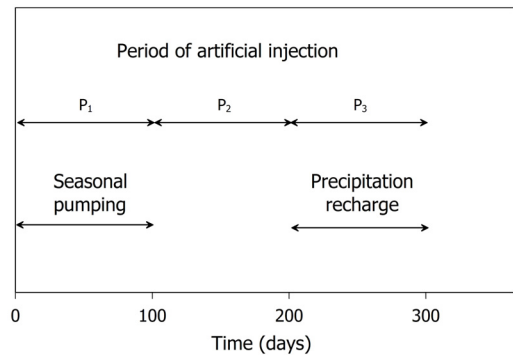


Fig. 2. Period of seasonal pumping, precipitation recharge and artificial injection.

3. 결과 및 고찰

3.1 SDF가 큰 경우

먼저 SDF가 큰 경우, 계절양수 시 양수량과 인공 함양 위치 및 시기를 변화시켜 지하수위와 지하수 저유량 변화를 살펴보았다. SDF를 산정하기 위해서는 하천과 우물사이의 거리가 필요하지만, 위의 개념모델의 경우 함양패키지를 이용하여 모델 영역의 전 지역에서 고르게 양수되도록 설정하여 하천과 우물사이의 거리는 0-4 km까지의 범위를 가진다. 따라서 모델영역의 중앙을 대표지점으로 가정하고

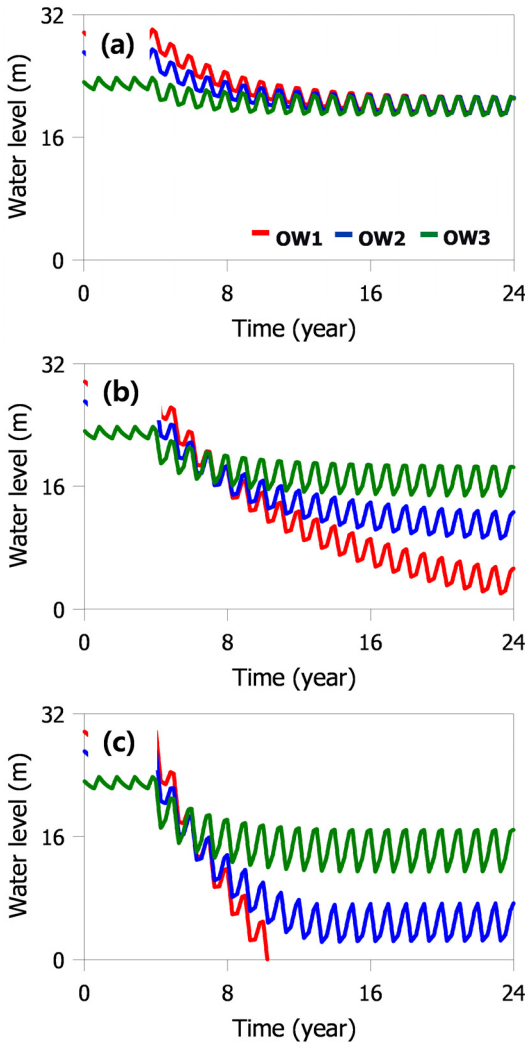


Fig. 3. Comparison of the groundwater level caused by pumping. The pumping rates are (a) one, (b) two and (c) three times the recharge rate.

SDF를 계산하였다. 또한 SDF는 투수량계수에 의해 계산되기 때문에 대수층 두께가 일정한 피압대수층에 대해 적용하는 것이 일반적이며, 자유면대수층의 경우 양수 시 시간에 따라 대수층 두께가 감소하기 때문에 SDF를 적용하는데 있어 불확실성을 보인다(Lee et al., 2016). 본 연구에서는 하천에서의 평균 포화대 두께를 사용하여 계산함으로써 대략적인 값을 구하였다. 따라서 하천과 우물사이의 거리는 2 km, 비산출률은 0.1, 수리전도도는 10 m/day, 포화대 두께는 20 m이며, 이를 통해 계산된 SDF는 2000 days이다.

3.1.1 양수량이 지하수위 및 지하수 저유량에 미치는 영향

양수량에 따른 지하수위 변화와 하천-대수층 상호작용을 살펴보기 위하여 양수량을 함양량의 1배 ($3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$), 2배($6.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$), 3배($9.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)로 증가시키며 물수지 변화를 살펴보았다. 그림 3은 계절양수 시 양수량에 따른 관측점의 수위 변화를 나타낸 것으로, 계절양수 기간에 하강하였다가 양수가 중단되면 상승하는 연주기 변동을 보였으며, 하천에 가까울수록 동적평형상태에 빠르게 도달

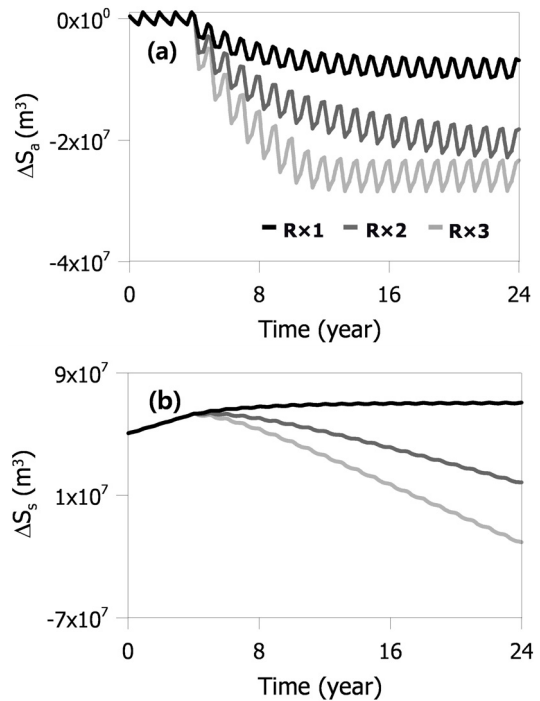


Fig. 4. Changes in (a) aquifer storage (ΔS_a) and (b) river storage (ΔS_r) as affected by pumping rates.

하였다. 양수량이 증가할수록 연주기 변동폭은 증가하였으며, 평형상태에 늦게 도달하여 지하수위는 해가 지날수록 더 하강하였다. 특히 하천에서 멀리 떨어진 배후지 관측점(OW1)의 경우 수위 강하가 더욱 크게 나타났다. 함양량의 2배를 양수할 경우 15년 후, 함양량의 3배를 양수할 경우 6년 후 지하수 고갈 문제가 발생하였다(그림 3b, 3c). 즉, 양수량이 증가할수록 지하수는 더 빠르게 고갈되었으며, 하천으로부터 거리가 먼 배후지부터 지하수 고갈 문제가 발생하는 것으로 분석되었다. 양수정 주변에서의 지하수위 강하는 원추형으로 발생하므로 실제 관정에서의 수위강하는 모델에서 계산된 값에 비해 더 크게 발생한다. 따라서 실제 관정에서는 지하수 고갈 문제는 수치모델의 계산 결과보다 더 빠르게 발생할 것으로 추정된다.

그림 4는 양수량에 따른 지하수와 하천의 저유량 변화를 보여주는 그림이다. 저유량 변화는 양수량이 함양량과 동일한 경우(R×1), 함양량의 2배(R×2), 3배(R×3) 일 경우를 살펴보았다. 지하수 저유량은 지하수위 변동과 유사한 연주기 변화를 보이는 반면, 하천의 저유량은 연주기 변동이 매우 약하게 나타났다. 함양량과 동일한 양을 양수할 경우 대수층의 저유량만 감소하였지만, 양수량이 증가하면 하천의 저유량도 서서히 감소하였다. 양수량이 증가하면 계절

양수의 영향이 하천까지 도달하여 하천수가 유입되면서 하천의 저유량이 감소하는 것으로 분석되었으며, 양수량이 증가할수록 더 많은 양의 하천수가 유입되는 것으로 나타났다.

3.1.2 인공함양 위치에 따른 지하수위 상승량 평가

인공함양 시 지하수위를 효과적으로 회복시키기 위해서는 인공함양 위치 및 시기 선정이 매우 중요하다. 위의 개념모델과 같이 우물이 균집형태열로 설치되어 있을 경우 인공함양지는 우물 균집 내 중앙부 또는 우물 균집을 벗어난 상류지점에 위치하는 것이 가장 효율적인 것으로 분석된 바 있다(Lee *et al.*, 2014). 이는 지하수를 연중 양수하는 시나리오의 결과이며, 계절양수를 고려할 경우 인공함양지의 최적 위치를 선정하는 문제는 다루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 계절양수 시 인공함양 위치에 따른 지하수위 변화 및 대수층의 물 수지 변화를 분석하였다. 양수량은 함양량의 2배($6.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)로 설정하였으며, 인공함양량은 양수량의 25%($1.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)로 설정하였다. 하천에서 3500 m 떨어진 기존의 인공함양 지점을 하천으로부터 2500 m 떨어진 곳으로 이동시켜 비교, 분석하였다.

그림 5는 인공함양 위치에 따른 지하수위 분포를

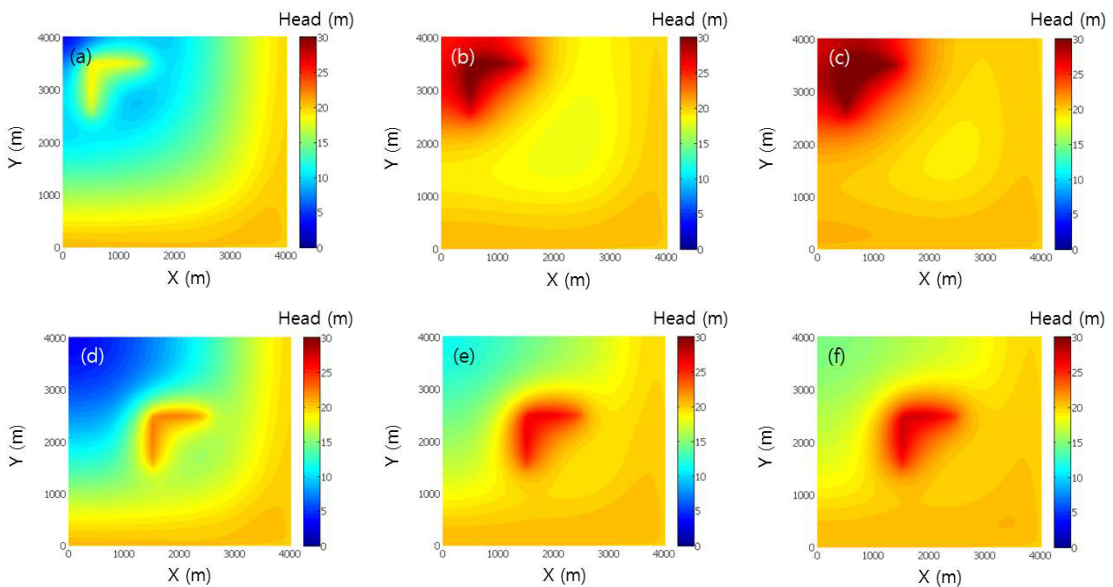


Fig. 5. Contour maps of ground water level (m) caused by artificial recharge at 3500 m from the stream (a) after 1 years, (b) after 10 years, (c) after 20 years, and at 2500 m from the stream (d) after 1 years, (e) after 10 years, (f) after 20 years.

보여주는 그림이다. 인공함양 초기에는 각각의 인공함양지를 중심으로 지하수위가 상승하였으며 주입의 영향이 점차 주변으로 전달되는 것으로 나타났다. 또한 해가 지날수록 인공함양의 영향이 누적되어 전 지역의 지하수위가 점차 상승하였다. 그러나 지하수 고갈 문제가 발생하는 배후지의 수위 변화를 살펴보면 하천과 먼 지점에 주입할 때 지하수위 상승 비율이 증가하였으며, 수위 회복이 빠르게 나타났다. 이는 인공함양지의 위치가 하천과 멀어질수록 주입수가 대수층에 머무는 체류시간이 증가하여 지하수 유출량이 감소하면서 나타난 결과이다. 따라서 인공함양의 위치는 하천과 이격거리가 크며, 지하수 고갈위험성이 높은 배후지에 직접 주입하는 것이 효율적인 것으로 분석되었다.

인공함양 위치에 따른 지하수의 저유량 변화를 살펴보면 하천으로부터 3500 m 떨어진 경우(location1) 보다 하천과 비교적 가까운 2500 m 떨어진 위치에 주입할 경우(location2) 대수층 저유량의 상승 비율이 감소되었고(그림 6), 하천의 저유량은 덜 하강하는 것으로 나타났다. 이는 인공함양지의 위치가 하천과 가까울수록 SDF가 감소하여 주입의 영향이 하천까지 빠르게 도달되어 지하수 유출량은 증가하고 하천으로부터 유입되는 물의 양이 감소하면서 나타난 결과이다. 또한 인공함양의 영향이 하천으로부터 바로 빠져나가지 못하고 잔류영향이 남아 해가 지날수록 대수층의 저유량이 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

3.1.3 인공함양 시기에 따른 지하수위 상승량 평가
인공함양 시기에 따른 영향을 알아보기 위해 인

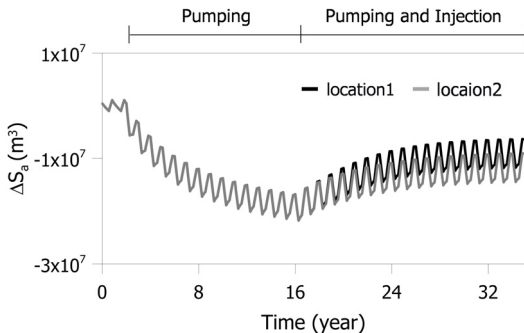


Fig. 6. Impact of artificial recharge on the aquifer storage (ΔS_a).

공함양 시기를 계절양수 기간인 0일에서 100일 사이 (P_1), 양수 중단 직후인 100일에서 200일 사이(P_2), 풍수기인 200일에서 300일 사이(P_3)로 구분하여 지하수위 변화를 비교하였다(그림 2). 그림 7은 인공함양시기에 따른 지하수위 변화를 보여주는 그림이다. 계절양수 시 지하수 고갈문제가 발생할 것으로 예상되는 배후지에 위치한 관측정(OW1)의 수위변화를 살펴본 결과 주입 당시 지하수위가 상승하므로 주입시기에 따른 지하수위 연 변화는 다르게 나타났지만, 주입의 영향이 누적되면서 해가 지날수록 연 평균 수위는 비슷한 상승곡선을 보였다. 마지막 1년의 수위변화를 비교해보면 계절양수 기간(P_1)에 주입할 경우 최소 수위가 약 22 m로 매우 높게 나타났

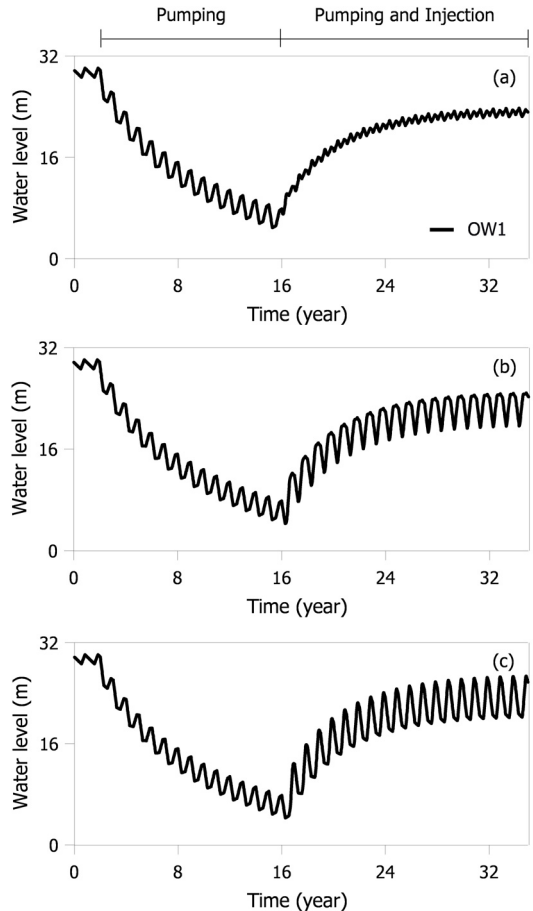


Fig. 7. Comparison of groundwater levels affected by the period of artificial recharge: (a) P_1 (0-100 days), (b) P_2 (100-200 days), (c) P_3 (200-300 days). The hydraulic conductivities of the aquifer is 10 m/day.

며, 계절 양수가 끝난 직후(P_2)와 풍수기(P_3)에 주입할 경우에도 약 19 m로 높은 수위가 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 SDF가 큰 경우 인공함양 시기가 지하수위 변화에 미치는 영향이 미미한 것으로 분석되어, 수자원 확보가 쉬운 여름철에 주입하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

3.2 SDF가 작은 경우

SDF가 작은 경우 계절양수와 인공함양의 영향을 알아보기 위해 대수층의 투수성 및 충적대수층의 크기를 변화시켜 지하수위 변화를 살펴보았다. 먼저 수리전도도를 5배 증가시켜(50 m/day) 관측정 수위 변화를 비교, 분석하였으며, 이때 계산된 SDF는 400 days이다. 양수량은 함양량의 5배($1.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$)

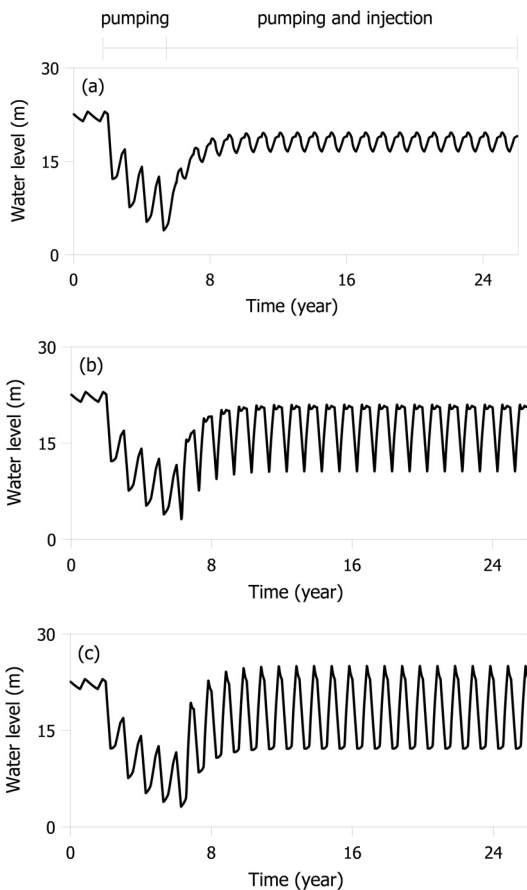


Fig. 8. Comparison of groundwater levels affected by the period of artificial recharge: (a) P_1 (0-100 days), (b) P_2 (100-200 days), (c) P_3 (200-300 days). The hydraulic conductivities of the aquifer is 50 m/day.

day)로 설정하였으며, 인공함양량은 양수량의 25% ($4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)로 설정하였다.

그림 8은 인공함양 시기에 따른 지하수위 변화를 보여주는 그림이다. 배후지에 위치한 관측정(OW1)의 수위 변화를 살펴보면 계절양수 기간에 인공함양할 경우, 인공함양의 영향과 양수의 영향이 중첩되어 수위가 비교적 조금 하강하였다. 한편, 양수 직후와 풍수기에 인공함양할 경우 인공함양 기간 동안 지하수위가 즉각적으로 상승하였지만, 인공함양의 영향이 이듬해 양수 시작 전까지 모두 전달되지 못하여 지하수위는 각각 약 10 m, 11 m까지 하강하는 것으로 나타났다. 이는 인공함양과 계절양수의 이격 시간 사이에 하천과 대수층의 상호작용으로 발생하는 지하수 유출과 하천 수 유입에 따른 결과이다. SDF가 작으면 대수층의 반응속도가 빨라지기 때문에 인공함양과 계절양수의 이격 시간이 길수록 인공함양된 지하수는 대수층에 남아 있지 못하고 하천으로 빠르게 유출된다. 따라서 SDF가 작은 대수층 조건의 경우 양수가 이루어지는 겨울철에 인공함양을 실시하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

한편, 하천과 양수정 사이의 거리는 SDF에 큰 영향을 주는 변수이므로 효율적인 인공함양 기법을 모의하기 위하여 충적층 크기가 미치는 영향을 살펴보았다. 충적대수층 크기에 따른 지하수위 변화를 살펴보기 위해 모델 영역을 4 km × 4 km에서 1 km × 1 km로 감소시켜 결과를 비교, 분석하였다. 이때 계산된 SDF는 125 days이다. 대수층의 크기가 감소하면 수리전도도가 증가한 경우와 마찬가지로 SDF가 감소하여 대수층의 반응속도가 빨라지는 것으로 나타났다. 인공함양 시 즉각적으로 지하수위가 크게 상승하였지만 인공함양 이후 급격하게 하강하여 이듬해 계절양수까지 인공함양의 영향이 거의 남아있지 않았다. 또한 더 빠르게 새로운 동적 평형상태에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 대수층의 크기가 작을 경우도 수리전도도가 큰 경우와 마찬가지로 계절양수 기간에 인공함양을 실시하여야 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

4. 결론 및 토의

지하수 모델링 기법을 이용하여 과도한 계절양수로 지하수 고갈이 발생한 지역에서의 지하수 인공함

양을 모의하였으며, 인공함양 시기 및 위치에 대한 다양한 시나리오 분석을 통하여 효율적인 인공함양 방안을 제시하였다. 양수 또는 인공함양에 의해 대수층에 가해진 수리적 스트레스는 하천-대수층 상호작용을 통하여 해소되는데, 대수층의 규모와 수리적 특성에 의해 결정되는 수리인자인 SDF의 크기에 따라 스트레스가 해소되는데 걸리는 시간과 대수층의 반응이 크게 달라진다. 따라서 SDF에 따라 효율적인 인공함양 전략이 달라질 수 있다.

먼저 SDF가 큰 지역, 즉 충적층의 분포 면적이 크거나, 수리전도도가 작아 SDF가 수 1000 days 정도의 큰 값을 보이는 지역에 대한 모사 결과, 계절양수에 의한 지하수위 강하가 수년에서 수십 년 동안 매우 서서히 발생하였다. 하천에서 가까운 관정은 동적인 평형상태에 빠르게 도달하였으며, 하천에서 멀어질수록 수위강하가 지속적으로 진행되어 결국 배후지 지역에서부터 지하수 고갈 문제가 발생하였다. 하천에서 멀리 떨어진 배후지는 양수에 대한 대수층의 수리적 반응시간이 매우 커서 지속적인 지하수위 강하가 발생하지만, 동시에 인공함양에 대해서도 동일한 반응을 보이므로 인공함양 효과가 장기간 지속되면서 뚜렷한 지하수위 회복을 나타내는 인공함양의 최적지라 할 수 있다.

SDF가 큰 지역의 경우 인공함양 시기를 다르게 하더라도 지하수위 회복 측면에서 인공함양의 효과는 크게 달라지지 않았다. 시설재배 기간인 동절기와 강수량이 많은 하절기는 약 200일 정도의 시간 차이가 있으나, SDF의 1/10에 불과하므로 두 시기의 인공함양에 대한 대수층의 수리적 반응은 장기적인 관점에서 크게 다르지 않기 때문인 것으로 해석된다. 따라서 동절기에 주입수의 확보가 용이하지 않은 지역의 경우 풍수기에 인공함양을 실시하여 계절양수 시기 이전에 미리 지하수 저유량을 증가시키는 것도 전략적으로 유효한 방법이라 할 수 있다. 연중 주입수 확보가 가능한 지역의 경우 계절양수 시기에 관계없이 연중 상시적으로 인공함양을 실시하는 것이 바람직하다.

한편, SDF가 작은 지역, 즉 충적층의 분포 면적이 작거나, 수리전도도가 커서 SDF가 수 100 days 정도의 값을 보이는 지역의 경우, 계절양수에 의해 대수층에 가해진 수리적 스트레스가 수 년 이내에 빠르게 해소되면서 새로운 동적 평형상태에 도달하였다.

인공함양에 대한 대수층의 반응도 양수에 대한 반응과 마찬가지로 매우 빠르게 나타났다. 즉, 인공함양에 의해 발생한 지하수위 상승은 하천-대수층 상호작용을 통하여 빠르게 해소되어 인공함양 효과가 지속되는 시간이 SDF가 큰 지역에 비하여 상대적으로 짧게 나타났다. 따라서 하절기에 인공함양을 실시할 경우 계절양수 시기인 동절기에는 하절기 인공함양의 효과가 크게 소멸되므로 결과적으로 인공함양에 의한 장기적인 지하수위 상승을 기대할 수 없다. 따라서 SDF가 작은 지역의 경우 계절양수와 동일한 시기에 인공함양을 실시하여 인공함양에 의해 주입된 지하수가 양수에 의해 바로 배출되도록 하는 것이 효율적인 인공함양 전략이라 할 수 있다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alley, W.M., Healy, R.W., LaBaugh, J.W. and Reilly, T.E., 2002, Flow and storage in groundwater systems. Science, 296, 1985-1990.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego, CA, 381 p.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, 10, 121-142.
- Chung, I.M. and Lee, J., 2013, A method of estimating the volume of exploitable groundwater considering minimum desirable streamflow. The Journal of Engineering Geology, 23, 375-380 (in Korean with English abstract).
- Constanz, J., 1998, Interaction between stream temperature, streamflow, and ground-water exchanges in apline streams. Water resources research, 34, 1609-1615.
- Jenkins, C.T., 1968, Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells. Ground Water, 6, 37-46.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M. and Kim, C.H., 2012, Change of groundwater-streamflow interaction ac-

- cording to groundwater abstraction in a green house land. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45, 1051-1067 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. and Kim, Y.J., 2009, Artificial recharge to cope with climate change. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42, 58-65 (in Korean).
- Kim, Y. and Kim, Y.J., 2010, A review on the state of the art in the management of aquifer recharge. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 521-533 (in Korean).
- Kim, Y., Seo, J.A. and Ko, K., 2012, Trend and barrier in the patents of artificial recharge for securing groundwater. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 59-75 (in Korean with English abstract).
- Kinzelbach, W., Bauer, P., Siegfried, T. and Brunner, P., 2003, Sustainable groundwater management problems and scientific tools. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 26, 279-284.
- Koo, M.H. and Lee, D.H., 2002, A numerical analysis of the water level fluctuation method for quantifying groundwater recharge. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 407-420 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2009, *Integrated Technologies in Securing and Applying Groundwater Resources to Cope with Earth Environmental Changes*. Ministry of Knowledge Economy, 379 p (in Korean with English abstract).
- Lee, H., Koo, M.H. and Kim, Y., 2014, Determining optimal locations of an artificial recharge well using an optimization-coupled groundwater flow model. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 19, 66-81 (in Korean with English abstract).
- Lee, H., Koo, M.H., Lim, J., Yoo, B.H. and Kim, Y., 2016, Impacts of seasonal pumping on stream depletion. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 21, 61-71 (in Korean with English abstract).
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Chapter A1, U.S. Government Printing Office, Washington, 528 p.
- Oh, S.H., Kim, Y. and Koo, M.H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 34-45 (in Korean with English abstract).
- Park, D., Koo, M.H. and Kim, Y., 2015, Hydro-thermal numerical simulation for an artificial recharge test in a fractured rock aquifer. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 65-75 (in Korean with English abstract).
- Seo, J.A., Kim, Y., Kim, J.S. and Kim, Y.J., 2011, Site Prioritization for Artificial Recharge in Korea using GIS Mapping. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 66-78 (in Korean with English abstract).

Received : May 28, 2016

Revised : June 21, 2016

Accepted : June 21, 2016